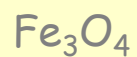
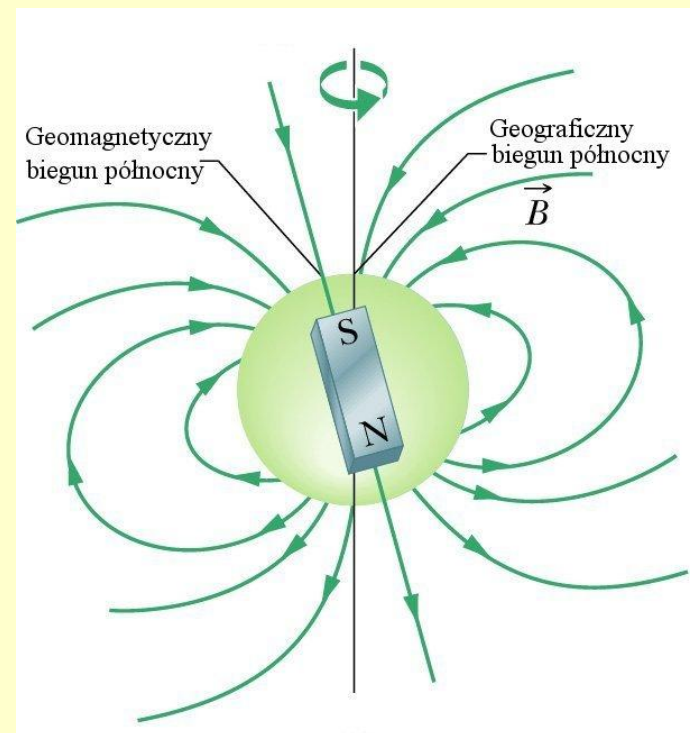
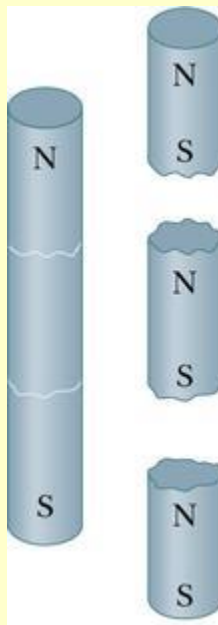
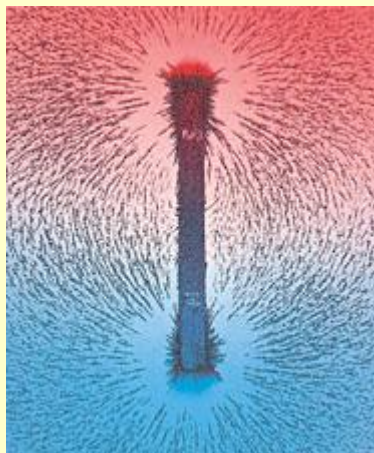


Własności magnetyczne materii

Dipole magnetyczne

Najprostszą „strukturą magnetyczną” są magnetyczne dipole.

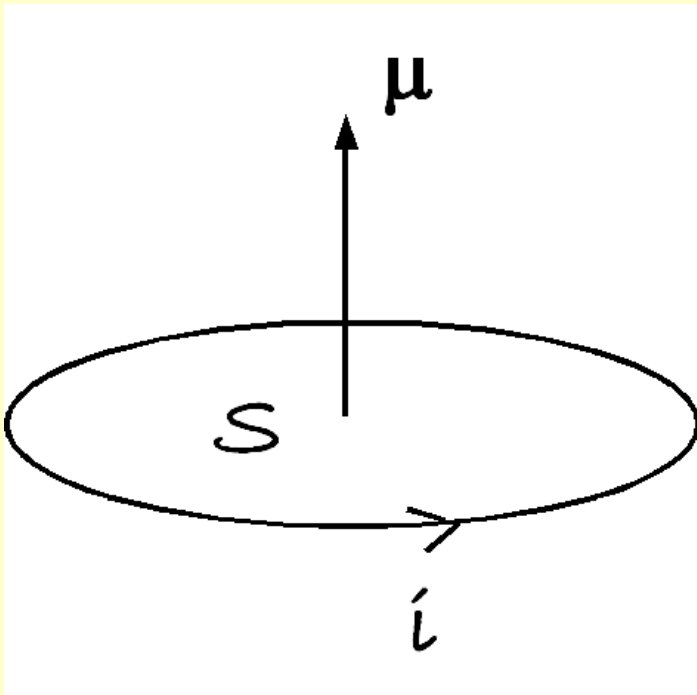


Kompas, Chiny
220 p.n.e



Kołowy obwód z prądem – dipol magnetyczny !

Wartość **B** w środku kołowego przewodnika:



$$B = \frac{\mu_0 i}{2r}$$

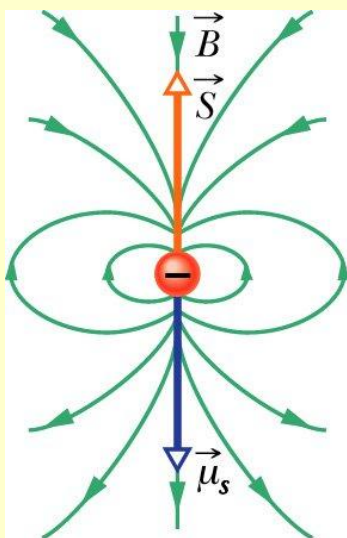
Moment magnetyczny :

$$\mu = i S$$

Źródłem magnetyzmu substancji są atomowe momenty magnetyczne

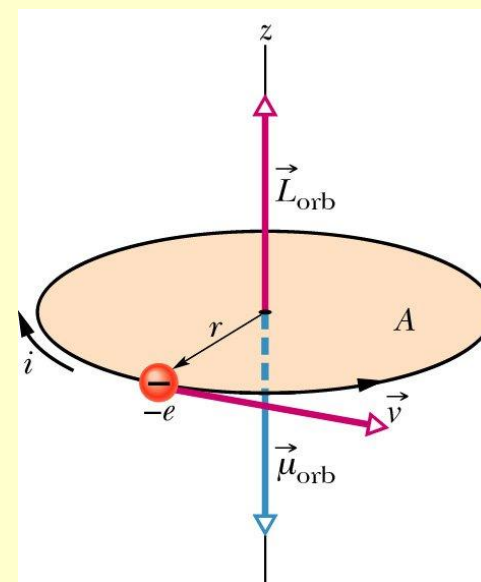
Elektron posiada magnetyczny moment dipolowy związany z orbitalnym momentem pędu \mathbf{L} .

$$\mu = IS = \frac{e}{T} \pi r^2 = \frac{e}{2m} \cdot \left(m \frac{2\pi r}{T} \right) \cdot r = \frac{e}{2m} \cdot (m\mathbf{v}) \cdot r$$



$$\mu_e = \frac{e}{2m} \mathbf{L}$$

Również z jego spinem związany jest spinowy moment magnetyczny.



Moment magnetyczny atomu to suma jego momentów magnetycznych orbitalnych i spinowych.

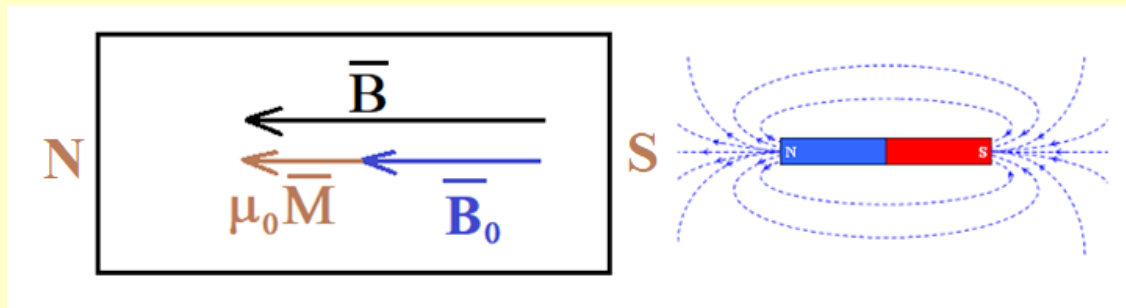
Własności magnetyczne ciał są określone przez zachowanie się elementarnych **momentów (dipoli)** magnetycznych w polu magnetycznym.

Wprowadzamy pojęcie **wektora polaryzacji magnetycznej** \mathcal{M} nazywanej też **namagnesowaniem** :

$$\mathcal{M} = \frac{\sum \mu}{V}$$

Jeżeli materiał umieścimy w polu magnetycznym \mathbf{B}_0 to pole to dąży do ustawienia dipoli w kierunku pola i w efekcie powstaje w próbce wypadkowe pole o indukcji :

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathcal{M} = \mu_r \mathbf{B}_0$$



$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathcal{M} = \mu_r \mathbf{B}_0$$

$$\mu_r = 1 + \mu_0 \frac{\mathcal{M}}{B_0} = 1 + \chi$$

$$\chi = \mu_0 \frac{\mathcal{M}}{B_0}$$

wielkość χ nazywana jest podatnością magnetyczną

$$\mu_r = 1 + \chi$$

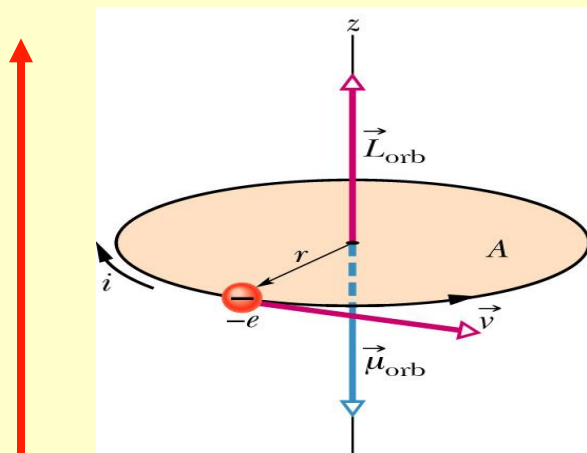
względna przenikalność magnetyczna

Własności magnetyczne ciał

Diamagnetyzm

..... jest związany z orbitalnym momentem magnetycznym elektronu w atomie.

$B_0 \parallel z$



W obecności pola magnetycznego \rightarrow dodatkowy przyczynek do siły dośrodkowej od pola B_0 :

$$k \frac{Qe}{r^2} + B_0 ev = \frac{mv^2}{r}$$

- * $B_0 \parallel L$ i zwroty B_0 i L zgodne : Siła dośrodkowa wzrasta więc wzrasta prędkość elektronu i prąd spowodowany jego ruchem po orbicie. Wzrasta więc orbitalny moment magnetyczny, μ_{orb} o kierunku przeciwnym do pola B_0 .
- * $B_0 \parallel L$ i zwroty B_0 i L przeciwne : Siła dośrodkowa maleje więc maleje prędkość elektronu i prąd spowodowany jego ruchem po orbicie. Maleje więc orbitalny moment magnetyczny, μ_{orb} o kierunku zgodnym z polem B_0 .

W nieobecności zewnętrznego pola, orbitalne momenty magnetyczne mają przypadkowe kierunki (namagnesowanie $\mathcal{M} = 0$). Obecność zewnętrznego pola prowadzi do takiego ustawienia tych momentów, aby skompensować zewnętrzne pole ($\mathcal{M} < 0$).

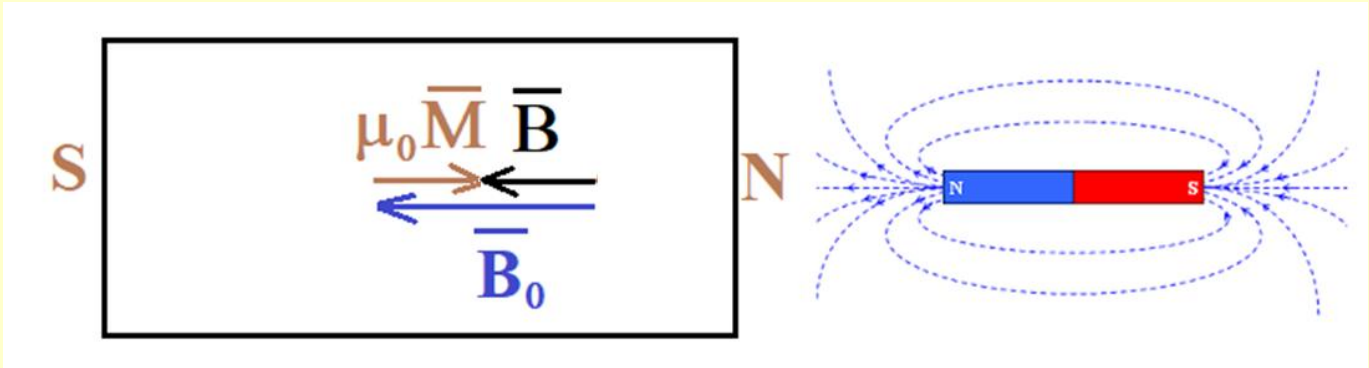
$$\chi < 0$$

$$\mu_r < 1$$

$$(\mu_r \approx 1)$$

$$\mu_r = 1 + \chi$$

Materiały diamagnetyczne są wypychane z pól magnetycznych – zgodnie z regułą Lentza.



Diamagnetyzm jest bardzo słabym efektem obserwowanym w atomach lub jonach o wypełnionych powłokach elektronowych

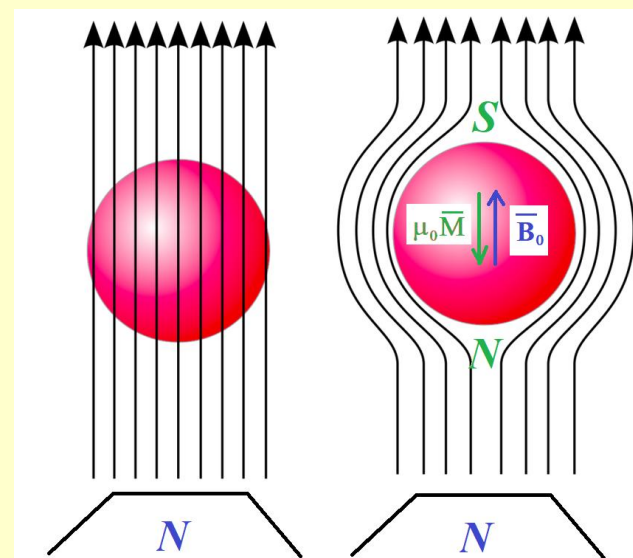
(np. gazy szlachetne, bizmut, krzem, cynk, magnez, złoto, miedź, fosfor, grafit, woda).

Materiał	χ_v
Woda	$-8,8 \times 10^{-6}$
Złoto	-34×10^{-6}
Bizmut	-170×10^{-6}
Grafit	-160×10^{-6}
Grafit krystaliczny prostopadle do płaszczyzny kryształów	-450×10^{-6}
Grafit krystaliczny równolegle do płaszczyzny kryształów	-85×10^{-6}

$$\chi = \frac{\mu_0 M}{B_0}$$

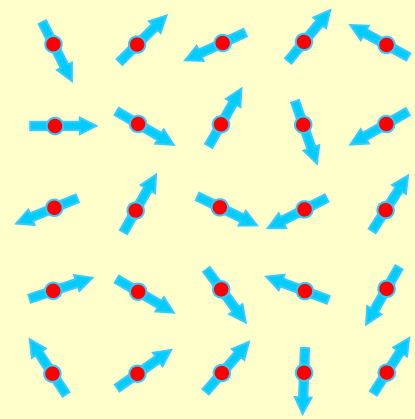
$$\mu_r = 1 + \mu_0 \frac{M}{B_0} = 0$$

Nadprzewodniki można traktować jako doskonałe diamagnetyki ($\chi = -1$), ponieważ wypierają linie pola magnetycznego (efekt Meissnera).



Paramagnetyzm

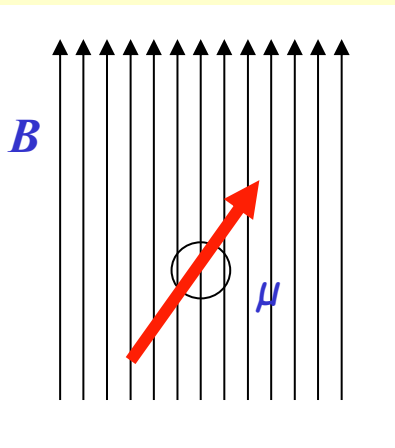
.... jest głównie związany ze spinowym momentem magnetycznym elektronu w atomie.



W paramagnetykach atomowe momenty magnetyczne słabo oddziałują.

W nieobecności zewnętrznego pola, spiny różnych atomów mają przypadkowe orientacje

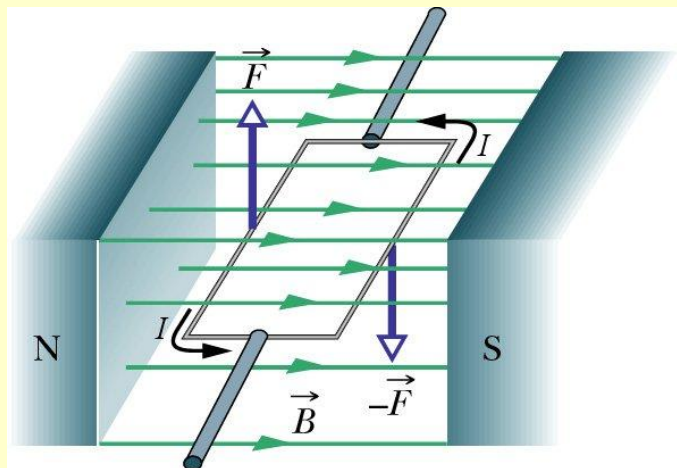
namagnesowanie
 $\mathcal{M} = 0$



Moment magnetyczny μ w polu B_0 doznaje działania momentu sił:

$$\mathbf{M} = \mu \times \mathbf{B}_0$$

Przypomnienie:
obwód z prądem



$$\mathbf{M} = I \mathbf{S} \times \mathbf{B}$$

$$\mu = IS$$

magnetyczny moment dipolowy

$$\mathbf{M} = \mu \times \mathbf{B}$$

Pole magnetyczne działa na ramkę z prądem momentem skręcającym obracając ją tak jak igłę kompasu. Ramka zachowuje się więc tak jak igła kompasu czyli dipol magnetyczny.

Paramagnetykami są ciała, których atomy posiadają wypadkowy moment magnetyczny różny od zera.

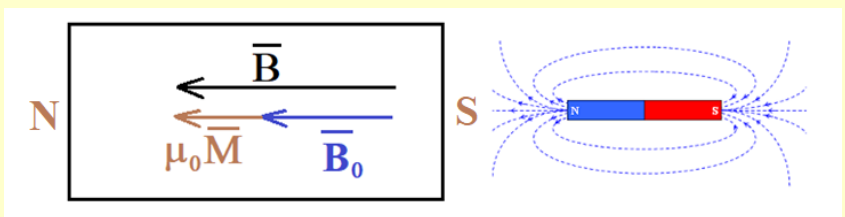
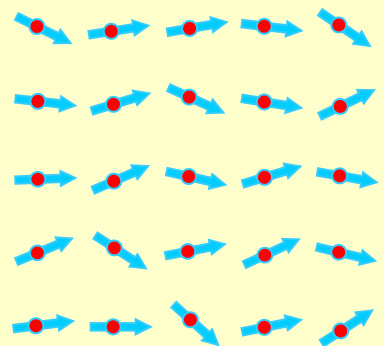
Np. atomy o nieparzystej liczbie elektronów, w których wypadkowy spin elektronów będzie zawsze większy od zera (mangan Mn, platyna Pt, wolfram W, tlen O).

W obecności pola momenty magnetyczne atomów porządkują się - tworząc wypadkowy moment magnetyczny.

Jego kierunek jest zgodny z kierunkiem zewnętrznego pola \mathbf{B}_0 .

$\chi > 0$

$\mu_r > 1$

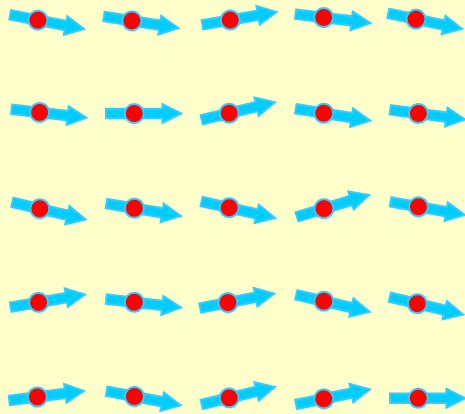


Dla paramagnetyków $\chi \approx 10^{-9} - 10^{-3}$ ($\mu_r \approx 1$)

dla paramagnetyków:

$\chi = \frac{C}{T}$

(prawo Curie)



namagnesowanie
 $\mathcal{M} \neq 0$

Ferromagnetyzm

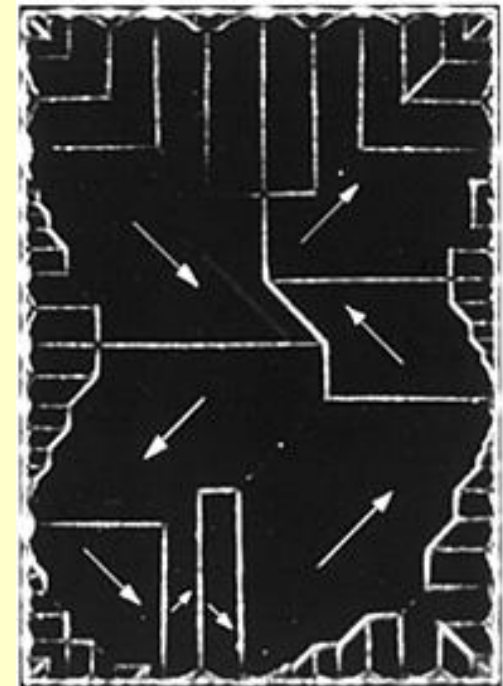
....silnie oddziałujące atomowe momenty magnetyczne
Momenty magnetyczne lokalnie porządkują się

Ferromagnetyzm jest związany z silnym oddziaływaniem wymiennym między spinowymi momentami magnetycznymi atomów.

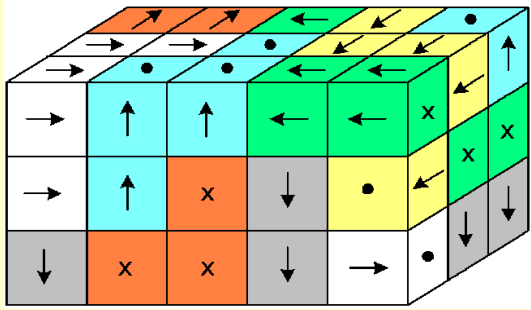
Jest on własnością **kryształów**, a nie pojedynczych atomów (żelazo Fe, kobalt Co, nikiel Ni, gadolin Gd).

Momenty magnetyczne w wyniku oddziaływania wymiennego, ustawiają się równolegle w dużych obszarach kryształu zwanych **domenami**.

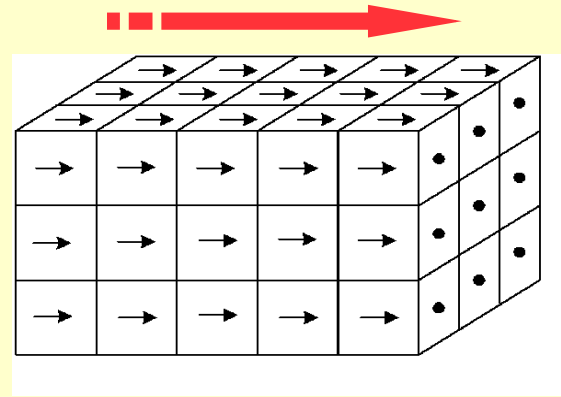
Natomiast próbka jako całość może nie mieć wypadkowego namagnesowania ($\mathcal{M} = 0$).



Ni

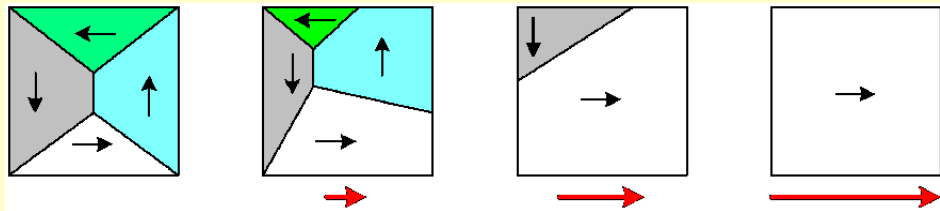


W nieobecności zewnętrznego B_0 momenty magnetyczne domen są nieuporządkowane



W obecności zewnętrznego B_0 momenty magnetyczne domen porządkują się zgodnie z polem

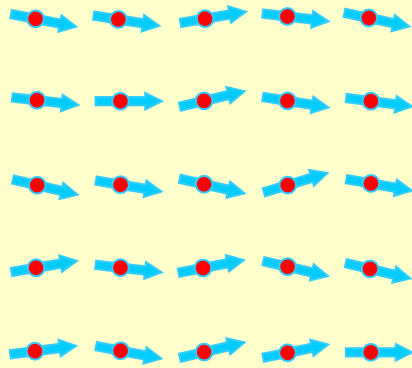
Większe pola sprzyjają powstawaniu większych domen:



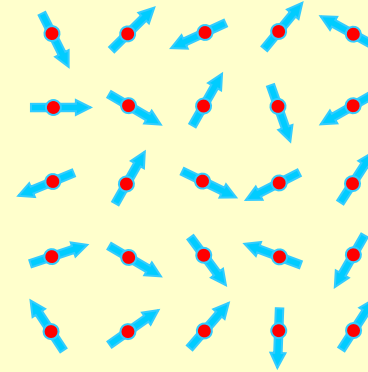
$$\chi \gg 0$$

$$\mu_r \gg 1$$

$$\chi \sim 10^4$$

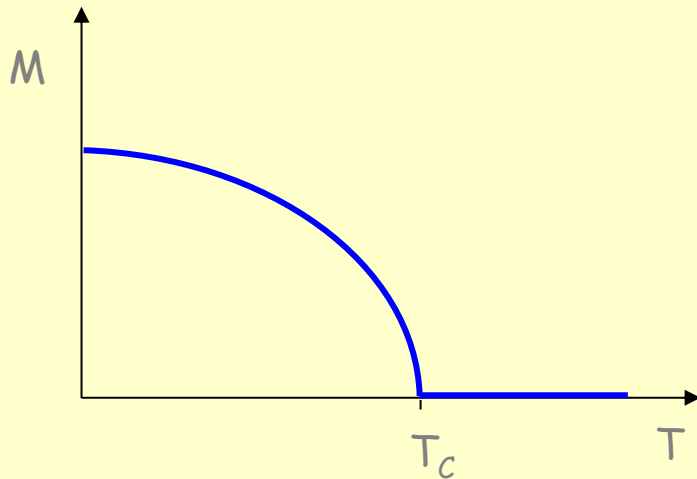


wzrost T



obszar ferromagnetyczny:
niskie temperatury
(poniżej temperatury Curie)

obszar paramagnetyczny:
wysokie temperatury
(powyżej temperatury Curie)



Ferromagnetyki w T pokojowej:

żelazo Fe	$T_C=1043\text{ K}$
kobalt Co	$T_C=1388\text{ K}$
nikiel Ni	$T_C=627\text{ K}$
gadolin Gd	$T_C=292\text{ K}$

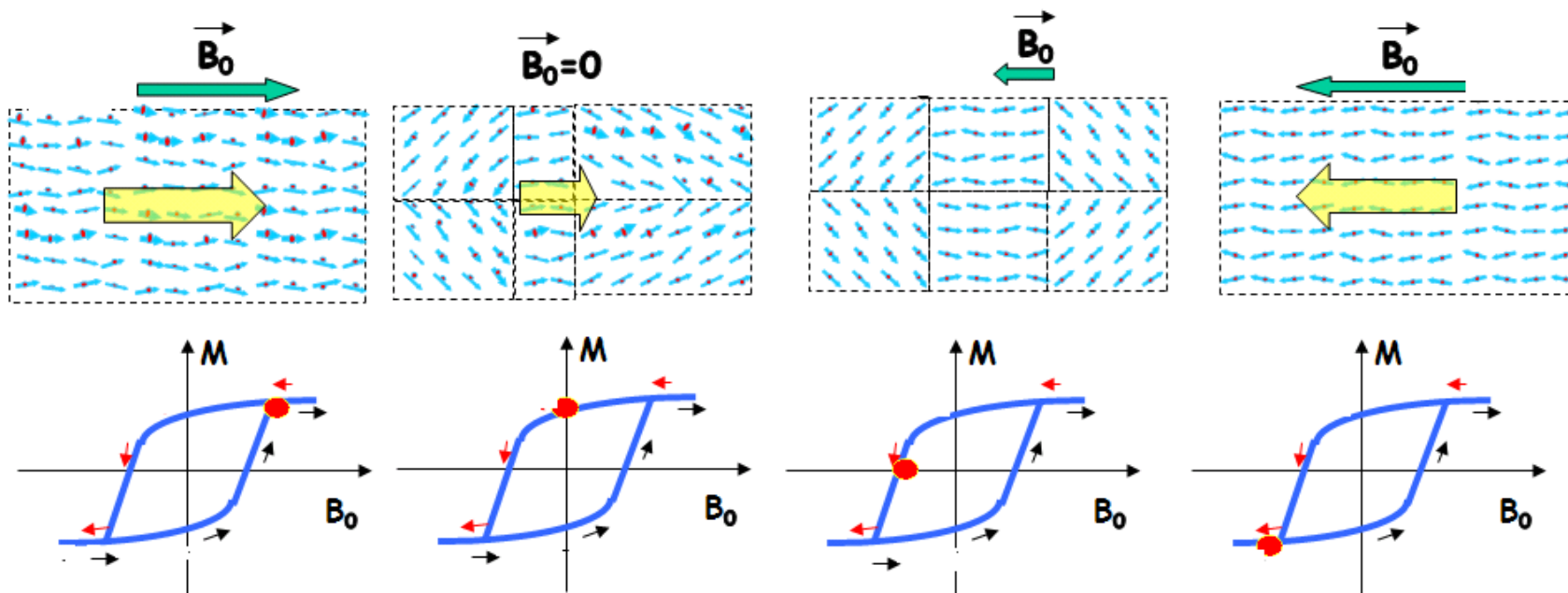
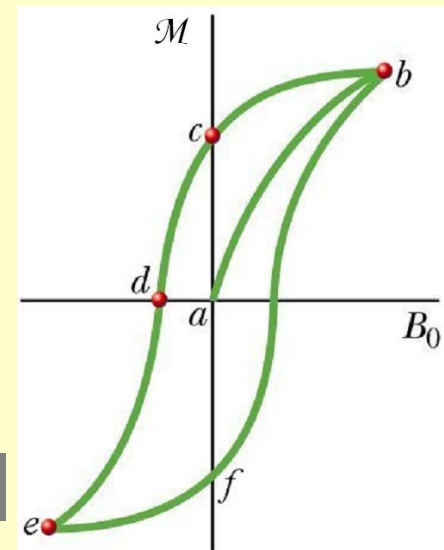
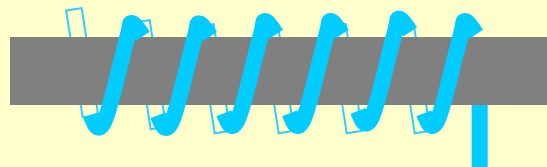
$$\chi = \frac{C}{T - T_C}$$

prawo Curie-Weissa
(powyżej T_C)

Magnesowanie materiałów magnetycznych - pętla histerezy

Zewnętrzne pole magnetyczne B_0 porządkuje momenty magnetyczne domen w obszarze ferromagnetycznym

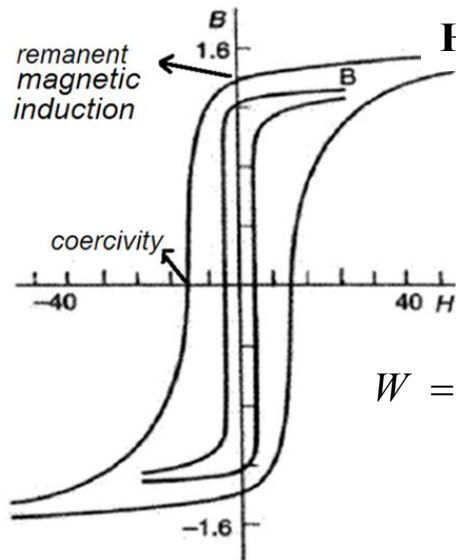
- (a) materiał nienamagnesowany
- (b) namagnesowanie nasycenia
- (c) pozostałość magnetyczna
- (d) pole koercji
- (e) namagnesowanie nasycenia



materiały magnetyczne:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathcal{M} = \mu_r \mathbf{B}_0$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_0 / \mu_0$$

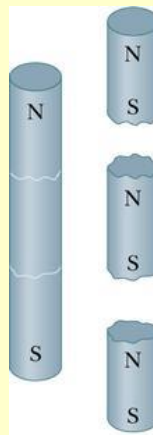


(A) : pure iron

(B) textured alloy 97Fe-3Si

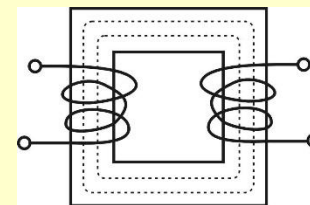
$$W = \int_{H_1}^{H_2} B dH$$

Magnesy trwałe (twarde – duże pole koercji, pozostałość magnetyczna ~1T):
alnico - wykonane ze związków glinu, niklu i kobaltu (Al-Ni-Co),
spiekane proszki na bazie ziem rzadkich (neodymowe $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, samarowo-kobaltowe SmCo_5),
magnesy niemetaliczne, zbudowane z polimerów zawierających nikiel.



ferryty : ceramiki, spiekane proszki Fe_2O_3 z tlenkami metali (MnO , CuO , NiO , MgO) mogą być zarówno miękkie jak i twarde. Słabo przewodzą prąd i są ferrimagnetykami.

Magnesy miękkie (małe pole koercji, $\mu_r = 10^4 - 10^6$): stal niskowęglowa (ferrytyczna), stal krzemowa (Fe-Si), stopy żelazo-nikiel (permalloy Ni-Fe, superpermalloy Ni-Fe-Mo-Mn), ferryty (słabo przewodzą prąd – brak prądów wirowych) .



Magnesy półtwarde (małe pole koercji)
napylane warstwy magnetyczne, dyski magnetyczne ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Co}$) , taśmy magnetyczne CrO_2 , Fe_2O_3 .)

